

# DISEÑO DE UN SISTEMA DE INYECCIÓN DE CORRIENTE EN POZO (SICP)

## MODELADO DE LA TUBERÍA DE PRODUCCIÓN

---

**OMAR LEONARDO PEÑA GALVIS**

*Ingeniero Electrónico*

*Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica, GISEL*

*Universidad Industrial de Santander*

*omarleonardo@telebucaramanga.net.co*

**HERMANN RAÚL VARGAS TORRES.**

*Doctor en Ingeniería Eléctrica*

*Profesor Asociado*

*Escuela de Ing. Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones*

*Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica, GISEL*

*Universidad Industrial de Santander*

*hrvargas@uis.edu.co*

**JAIRO HUMBERTO GUZMÁN MEJÍA**

*Físico, Universidad Nacional*

*Ingeniero Proyectos ICP ECOPETROL*

*jguzman@ecopetrol.com.co*

*Fecha de Recibido: 29/08/2007*

*Fecha de Aprobación: 16/05/2008*

## RESUMEN

El presente artículo resume el procedimiento para realizar el diseño conceptual de un Sistema de Inyección de Corriente en Pozo (SICP), que tiene por objeto elevar el gradiente de temperatura en la tubería de producción (Tubing-Casing) de un pozo petrolífero. Este incremento en la temperatura facilita la movilidad del crudo en ascenso por el tubing desde el fondo del pozo hasta la superficie. Para tal efecto, el SICP opera de la siguiente manera: Al tubing se le hará circular corriente eléctrica hasta el fondo del pozo, en donde se interconecta con el casing y éste a su vez con la tierra del sistema, cerrando de este modo el circuito. Este procedimiento genera un incremento de temperatura en la tubería como consecuencia de las pérdidas eléctricas (Histéresis y corrientes de Eddy) propias del acero, material ferromagnético con el cual se fabrica la tubería de producción.

**PALABRAS CLAVES:** Calentamiento electromagnético, Crudos Pesados, Impedancia de tubería, Sistemas de potencia, Control de puente inversor, Sistemas de adquisición de datos.

## ABSTRACT

This paper resumes the conceptuality design process of Injection Current System in Well (SICP), with object to elevate the gradient of temperature in the production pipe (Tubing-Casing) of an oil well. This increment in the temperature facilitates the mobility of the raw one in ascent for the tubing from the bottom of the well until the surface. For such an effect, the SICP operates in the following way: to the tubing will be made circulate electric current until the bottom of the well where is interconnected with the casing and this in turn with the earth of the system, closing the circuit this way. This procedure generates an increment of temperature in the pipe like consequence of the electric losses (Hysteresis and Eddy currents) characteristic of the steel, material ferromagnetic with which the pipe is manufactured.

**KEYWORDS:** Electrical Heating, Heavy oil, Pipe impedance, Power System, Inverse bridge Control, Data acquisitions system.

## 1. INTRODUCCIÓN

El mundo se enfrenta a grandes retos energéticos para el futuro, según la Agencia para la Administración Energética EIA, la demanda de energía a nivel global crecerá cerca de un 71% entre los años 2003-2030, [1]. Siendo esta demanda en su mayoría asociada al consumo de hidrocarburos. El problema radica en que las reservas de crudo mundiales se agotarán aproximadamente en 50 años [2] y no existe a la fecha una fuente energética con suficiente potencial (viabilidad técnica-económica) para reemplazar al petróleo y cubrir las necesidades energéticas globales.

En Colombia la situación no es diferente, ya que se presenta un agotamiento de las reservas de crudo y se pronostica un autoabastecimiento hasta el año 2015 [3]. Además, buena parte de las reservas disponibles en el país y en el mundo son de crudos pesados, los cuales son menos atractivos de explotar, por su alta viscosidad que dificulta su extracción. Asimismo, los crudos pesados contienen altos contenidos de impurezas y por consiguiente, el precio comercial es inferior al de referencia WTI. Sin embargo, la tendencia creciente del precio del crudo hace rentable la explotación de cualquier tipo de yacimiento petrolífero. Por ejemplo, ECOPETROL desarrolla el negocio de la extracción de crudos pesados en varios campos de los llanos orientales, como una de las principales actividades contempladas en su plan estratégico para los próximos cinco años [3].

Esto hace que un Sistema de Inyección de Corriente en Pozo (SICP) sea una alternativa técnico-económica viable para mejorar la extracción de crudos pesados en general [4], debido a que disminuye la viscosidad del crudo en ascenso por acción de la transferencia térmica del *tubing* al crudo. A su vez, se mejora el trabajo y la eficiencia de las bombas de extracción, prolonga el intervalo entre mantenimientos, alarga el ciclo de vida útil para las bombas de extracción y se evita el taponamiento de la tubería por precipitación de parafinas<sup>1</sup>.

En efecto, para la consecución de un sistema de calentamiento, se debe realizar estudios preliminares para determinar el diseño del SICP. Por tanto, se necesita conocer la transferencia de potencia al *tubing* empleando un modelo físico-matemático [5 - 6], a fin de obtener un punto de trabajo apropiado en la relación “consumo de potencia”-“calor generado”. Asimismo, se propone un modelo simple de impedancia eléctrica, con el ánimo de predecir la naturaleza de la impedancia propia de una configuración de tubería de producción [7 - 8]. Con los resultados del modelo se selecciona el

punto de operación del sistema en términos de potencia y rango de frecuencia [9-12]. A partir de este punto de operación se determina el criterio para la selección de cada uno de los componentes estructurales del SICP [13-15]. Como el sistema de control y el sistema de adquisición los cuales tienen la misión de monitorear y controlar las variables de corriente y de temperatura a lo largo del pozo [16-17].

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos con un prototipo escalado diseñado con la metodología anteriormente planteada. El cual junto con las simulaciones de los modelos desarrollados, confirman los resultados esperados por el sistema.

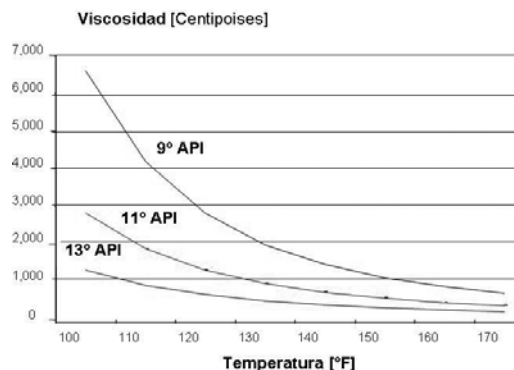
## 2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describen los conceptos teóricos en los cuales está sustentado el diseño del SICP.

### A. CRUDOS PESADOS

Como el objetivo principal del SICP es calentar los crudos en ascenso por la tubería de producción o *tubing*, es conveniente definirlo en términos de las propiedades que dependen de la temperatura. De este modo, los crudos pesados son definidos como una amalgama de hidrocarburos que varían de tipo, peso molecular y punto de ebullición, además, contiene otros compuestos tales como: metales, agua y azufre.

También, están caracterizados por tener una viscosidad elevada caracterizada por una gravedad °API<sup>2</sup> baja. Escala en la cual a menor °API el crudo es más denso o pesado. Infortunadamente, no existe una relación analítica para determinar la viscosidad de los crudos en función de la temperatura, debido a la heterogeneidad de los compuestos que conforman el crudo en cada yacimiento [18 - 20], ver **Figura 1**.



**Figura 1.** Curvas empíricas de Viscosidad del crudo contra temperatura a presión atmosférica

<sup>1</sup> Acumulación de partículas en la cara interior del *tubing*

<sup>2</sup> °API Asociado a la densidad del crudo con respecto a la del agua

No obstante, existen expresiones del coeficiente de viscosidad “ $\eta$ ” en función de la temperatura para fluidos laminares, ver ecuación (1), en la cual se confirma la tendencia exponencial y se estima el comportamiento del fluido frente a un cambio de temperatura.

$$\eta = \kappa e^{\frac{E_a}{\mathcal{R}\Delta T}} \quad (1)$$

Donde,  $\kappa$ : es constante,  $E_a$ : Energía de activación,  $\mathcal{R}$ : Constante de gases ideales,  $\Delta T$ : Diferencia de Temperatura.

Como se puede apreciar en la **Figura 1**, para crudos con gravedades °API bajas se presenta una disminución importante en la viscosidad por acción de un pequeño incremento de temperatura. Por consiguiente, se espera resultados significativos al aplicar la técnica de calentamiento electromagnético en pozos con crudos extrapesados o pesados.

## B. MODELO ELECTROMAGNÉTICO

Para encontrar las curvas de pérdidas eléctricas en función de la corriente y de la frecuencia, se procedió a caracterizar físicamente el comportamiento de la tubería debido a la circulación de corriente eléctrica. Para tal efecto, se deben realizar las siguientes suposiciones:

- La tubería es lo suficientemente larga como para que los efectos en la onda de corriente puedan ser reflejados a lo largo de la tubería.
- Se asume que la frecuencia de excitación es lo suficientemente baja para que longitud de onda no tenga efectos negativos como la existencia de corrientes de desplazamiento (radiación).
- Definir la corriente ( $I_t$ ) en el *tubing* con simetría cilíndrica y para calcular la corriente inducida en el *casing*, se reemplaza la corriente por una línea  $I_t$  en el eje  $a_r$  con  $r=0$ , ver **Figura 2**. Igualmente, se asume que la solución del campo es independiente de la dirección angular  $\varphi$ .

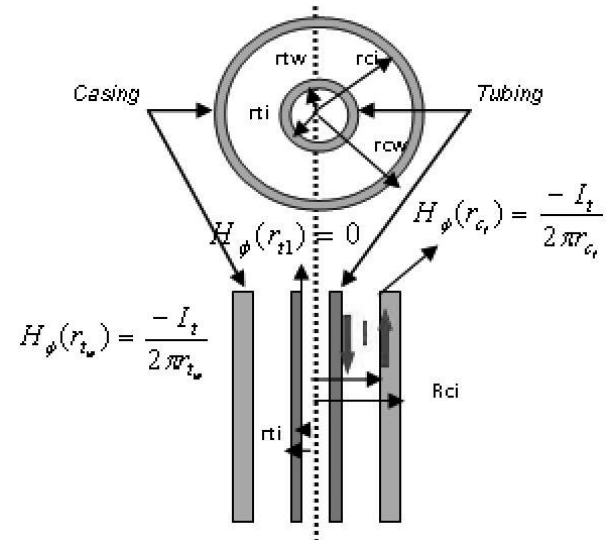
La solución del sistema se define por una ecuación en derivadas parciales, en términos de  $H(r)$ . A su vez se definen las condiciones de frontera (ver la **Figura 2**) y se obtiene la ecuación para el campo magnético (2).

$$\frac{\partial^2 H_\varphi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \rho} - \frac{H_\varphi}{\rho^2} = \sigma \mu (H_\varphi) \left( \frac{\partial H_\varphi}{\partial \tau} \right) \quad (2)$$

donde:

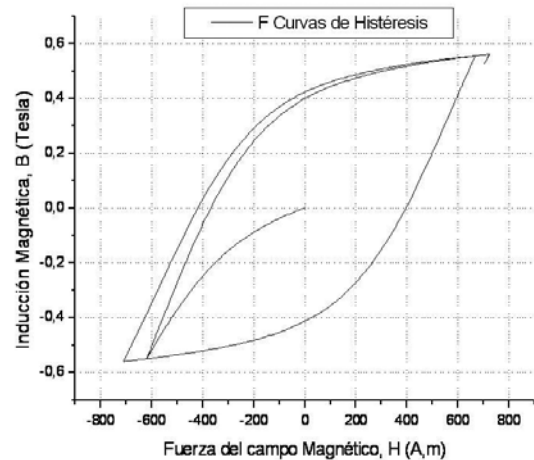
$E$  = Intensidad del Campo eléctrico [V/m]  
 $H$  = Intensidad del Campo magnético [A/m]  
 $\sigma$  = Conductividad eléctrica [ $\Omega/m$ ]  
 $\mu$  = permeabilidad del medio conductor [H]

$a_r, a_\phi, a_z$ , son las direcciones unitarias del sistema de coordenadas cilíndricas, siendo únicamente las competentes del campo presentes  $H_\varphi$  y  $E_z$ .



**Figura 2.** Vista frontal y superior de la tubería

Sin embargo, la ecuación (2) no tiene solución analítica debido a la relación no lineal del campo magnético  $H$  y la densidad del campo magnético  $B$ , como se puede apreciar en la **Figura 3**. Las cuales están relacionadas por lazos de histéresis propias del material. Por tal motivo, se requiere el uso de métodos numéricos para su solución.



**Figura 3.** Relación de H y B por lazo de Histéresis

En consecuencia, las variables independientes de la **Ecuación 2** se discretizan por medio del método de *Crank-Nicholson* [6] y se obtiene una solución para el campo magnético  $H_\varphi$  en un número finito de nodos en el

espacio y en un intervalo de tiempo específico, como se puede apreciar en la siguiente ecuación recursiva:

$$\begin{aligned} & \left( \frac{1}{\Delta r^2} - \frac{1}{2r_i \Delta r^2} \right) H_{i-1}^{n+1} + \left( -\frac{1}{r_i^2} - \frac{2}{\Delta r^2} - 2 \frac{\sigma_i \mu_i^n}{\Delta t} \right) H_i^{n+1} + \\ & \left( \frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r_i \Delta r^2} \right) H_{i+1}^{n+1} = - \left( \frac{1}{\Delta r^2} - \frac{1}{2r_i \Delta r^2} \right) H_{i-1}^n + \\ & \left( -2 \frac{\sigma_i \mu_i^n}{\Delta t} + \frac{1}{r_i^2} + \frac{2}{\Delta r^2} \right) H_i^n - \left( \frac{1}{\Delta r^2} + \frac{1}{2r_i \Delta r^2} \right) H_{i+1}^n \end{aligned} \quad (3)$$

Donde:

$\Delta r$ = denota el paso tomado para la discretización hecha para el objeto en función del radio.

$\Delta t$ = paso discreto para el tiempo

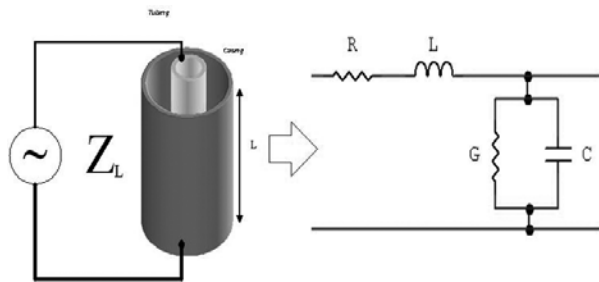
$n$ = indicador de tiempo discretizado

$i$ = indicador del radio del objeto discretizado

Para obtención de la solución es requerido que exista una medición de un lazo de histéresis, no necesariamente el máximo de saturación, para identificar el valor de la permeabilidad ( $\mu$ ) en función del tiempo.

### C. MODELO DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA

Otra forma de modelar la tubería, es recurrir a sus parámetros eléctricos, vista como una línea de transmisión (carga distribuida). Estos parámetros son: Resistencia (R), Inductancia (L), Capacitancia (C) y Admitancia (Y), como se puede observar en la **Figura 4**. Este modelo lineal, es válido para “estimar” el comportamiento de la carga (*tubing-casing*), ya que se puede encontrar un valor de impedancia en función de la longitud, geometría y tipo de material. Sin embargo se debe tener en cuenta que el comportamiento real de algunos parámetros, son dependientes de la frecuencia y la intensidad de corriente.



**Figura 4.** Modelo de impedancia eléctrica para la tubería de producción

En efecto, los parámetros circuitales se calculan con las siguientes expresiones [7]:

$$\begin{aligned} C &= \frac{2\pi\epsilon}{\ln(c/b)} (F/m) \\ L &= \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{c}{b}\right) (H/m) \\ G &= \frac{2\pi\sigma_o}{\ln(c/b)} (S/m) \\ R &= \frac{1}{2\pi\sigma_c} \left( \frac{1}{(b-a)^2} + \frac{1}{(d-c)^2} \right) (\Omega/m) \end{aligned} \quad (4)$$

Donde:

$a$ : Radio interior del (Tubing)

$b$ : Radio exterior del (Tubing)

$c$ : Radio interior del (Casing)

$d$ : Radio exterior del (Casing)

$\mu$ : Permeabilidad relativa del medio (material ferromagnético, no constante)

$\epsilon$ : Permitividad del medio aislante (aire  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$  F/m)

$\sigma_o$ : Conductividad del medio entre las tuberías (aire,  $\sigma_o \approx 0$ )

$\sigma_c$ : Conductividad del medio conductor

## 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

A continuación se describe en tres etapas el diseño conceptual del Sistema de Inyección de Corriente en Pozo SICP. La primera etapa consiste en la definición de las condiciones iniciales de operación, elementos esenciales que debe contener el pozo y los sistemas auxiliares del SICP, a fin que el calentamiento electromagnético sea exitoso.

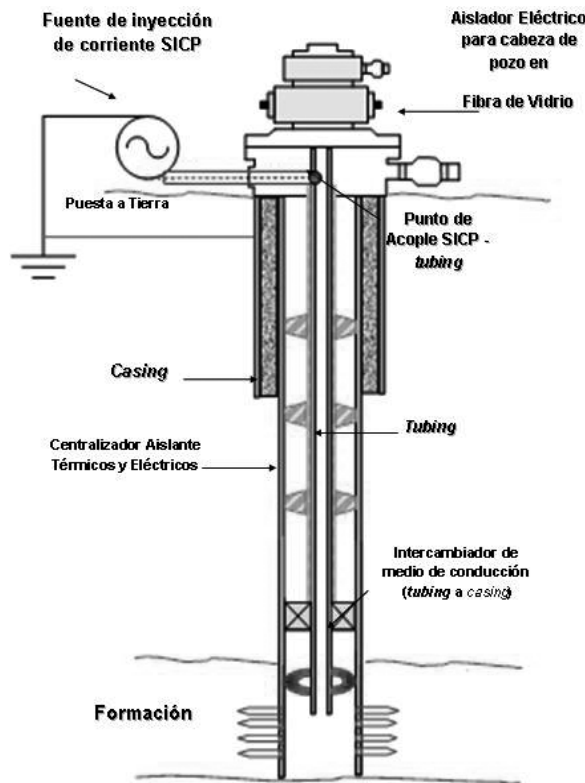
La segunda parte consiste en plantear el diseño del módulo de potencia del SICP. Y la última etapa, está constituida por la definición del módulo de control, encargado de manejar el módulo de potencia y la supervisión de las variables de temperatura y corriente en el pozo.

### A. CONDICIONES INICIALES DE DISEÑO

Para que el SICP sea efectivo se recomienda seguir las siguientes indicaciones: El sistema debe ser aplicado a pozos con crudos pesados con densidades menores a 13 °API, de acuerdo con la **Figura 1**, en la cual se aprecia claramente que a menor °API, el crudo presentara una mayor disminución en la viscosidad frente a un incremento de temperatura, situación deseada ya que no se requiere un  $\Delta T$  alto y por ende menor energía. Sin embargo, es necesario realizar un estudio completo de reología para determinar cual es valor de temperatura ideal de trabajo, en un pozo candidato. Así mismo, es preferible que la longitud de la tubería del pozo sea menor

a 4000 metros. Ya que los costos de la instrumentación y de instalación podrían ser elevados.

En la **Figura 5**, se ilustra las partes esenciales que debe contener un pozo para el proceso de calentamiento, como es el caso de sistemas de aislamiento entre el *tubing* y *casing*, sistema de interconexión entre el *tubing* y el *casing* en el fondo del pozo y aislante en la cabeza del pozo.



**Figura 5.** Sistema SICP conectado a un pozo productor

Por otra parte, se considera que la potencia que se disipa en calor en un metro de tubería para generar un incremento de temperatura  $\Delta T$  corresponde con la ecuación:

$$P = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (5)$$

Donde:

$\Delta T$  = Diferencial de temperatura ganado por un fluido laminar en tubería obtenido al calentar un metro de tubing [°K]

P = Potencia que se disipa en calor en un metro de tubería [W/m]

m = Masa contenida en un metro de tubería [kg]

c = Calor específico de la tubería [W/kg·K]

Como ejemplo de diseño se cuenta con las características del pozo C-70<sup>3</sup>, el cual presenta problemas de

precipitación de parafinas, las cuales se solidifican a los 30,1 °C y se derriten a los 54,44 °C. Pero en vista que la temperatura del pozo puede descender hasta 20 °C, se define que el máximo valor  $\Delta T$  que debe alcanzar el SICP es de 34,44 °K. Para obtener los parámetros de masa se utilizó la norma API 5CT ISO 11960, con la cual se obtiene que el valor de m para el tubing del pozo C-70 es m=134,1 Kg/m. El calor específico del acero al carbón es c=1,2796\*10<sup>-2</sup>W/kg·K. Con estos valores de diseño se requiere una potencia cercana a los 60VA/m, para elevar la temperatura 35° aproximadamente. Luego para calentar la longitud total del pozo (1030m) se requiere una potencia de 61,800 KVA.

Como resultado de estas consideraciones, se fija la potencia de trabajo nominal en 100kVA, valor suficiente para efectuar calentamiento en la tubería, según las simulaciones y el estado del arte [4, 9, 10]. Igualmente, se parte del hecho que el sistema de alimentación (subestación, líneas de transmisión), sistema de puesta a tierra, protecciones eléctricas y elementos de facilidades de pozo existen y están diseñados para soportar las condiciones de trabajo que impone el SICP.

## B. MÓDULO DE POTENCIA DEL SICP

El módulo de potencia es el encargado de entregar los niveles de tensión-corriente adecuadas para la carga. Como se mencionó anteriormente el valor de potencia a manipular es del orden de los 100kVA. Por consiguiente, este módulo está diseñado para soportar 120KVA, 20% de capacidad extra. El diseño general de este modulo esta basado en la arquitectura general de fuentes de potencia, utilizadas en aplicaciones industriales tales como: variadores de velocidad, UPS, hornos inductivos, filtros activos, entre otros.

En general, el módulo de potencia está constituido por los siguientes elementos, descritos a continuación:

- Puente rectificador, compuesto por un puente de diodos, convierte la señal de alimentación trifásica en una señal de tensión continua.
- Filtro pasa bajos, utilizado para eliminar el rizado producto de la rectificación y la contaminación de armónicas que produce el SICP en la red eléctrica.
- Este módulo puede ser opcional, ya que no se requiere alimentar la carga con una señal pura o armónica.
- Manejador de puente H, circuito interfaz entre módulo de control y el puente inversor, su función es proporcionar los niveles de tensión en las compuertas de cada transistor para su activación en forma controlada.
- Puente inversor, constituido por cuatro transistores IGBTs, este módulo es el encargado de convertir la señal de continua en señal alterna, de acuerdo a las

<sup>3</sup> Pozo del campo escuela colorado uis

exigencias que el sistema de control imponga.

- Bobina de acople, bobina en serie entre el puente H y la carga, es utilizada para realizar control de corriente.

Otra consideración importante, es la utilización de un transformador de aislamiento entre la salida del SICP y la carga (tubería de producción), el cual cumple con dos finalidades básicas: la primera, proporcionar aislamiento eléctrico entre el SICP y la carga, la segunda es manejar la potencia de manera adecuada entre el puente inversor y la carga. En efecto, la carga demanda grandes cantidades corrientes a bajas tensiones, mientras que la mayoría

de los IGBTs manejan tensiones altas y corrientes moderadas. Por lo tanto, el valor de transformación puede ser desde 1:1 hasta 100:1. La selección del valor de conversión será variable para cada pozo de acuerdo con la impedancia neta de la carga.

En la **Figura 6** se aprecia el circuito esquemático resultante del diseño, donde se puede distinguir los diferentes elementos del módulo de potencia: puente rectificador, puente inversor, manejador de puente, bobina y transformador de aislamiento.

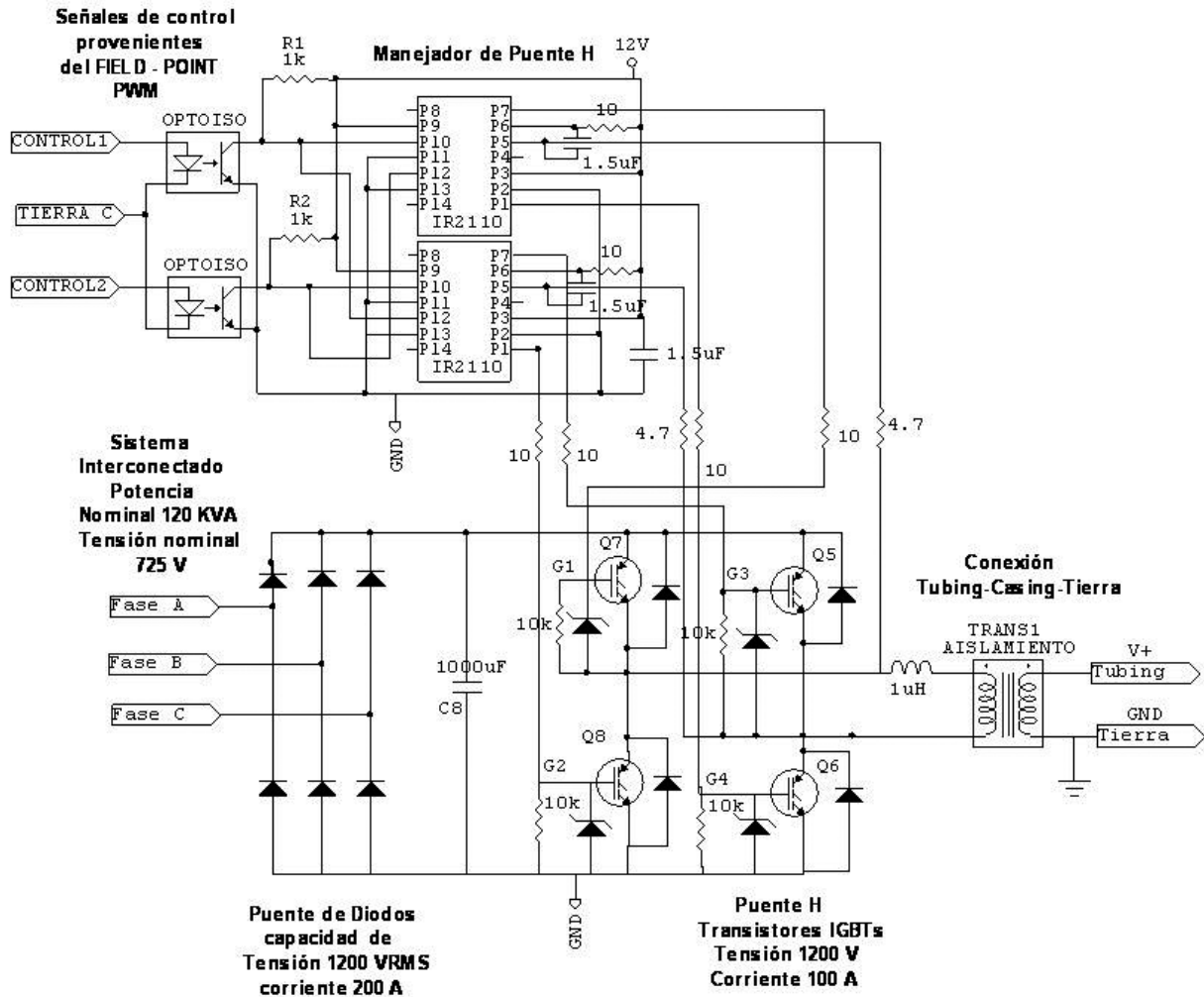


Figura 6. Circuito esquemático para el módulo de potencia del SICP

En la **Tabla 1**, se resumen las condiciones que debe cumplir cada uno de los componentes del módulo de potencia del SICP.

**Tabla 1.** Consideraciones de diseño para el módulo de potencia del SICP para 100kVA de potencia

Compte	Parámetros de selección
Puente rectificadora AC/DC	Puente rectificador trifásico conformado por 6 diodos con capacidad de potencia de 120 KVA, tensión nominal de 440 VRMS por fase
Maneja-dor de puente inversor	Puede estar conformado por un manejador de puente completo o por dos manejadores de medio puente. Debe soportar la tensión del barraje de continua.
Puente Inversor	Puente completo de transistores IGBTs. Los transistores debe tener capacidad para entregar una corriente nominal de 200 [A] a una tensión de 1200 [V], frecuencia de conmutación rápida entre 1kHz-10kHz. Alta eficiencia y de conmutación rápida. Cada transistor debe contar con un diodo anti-paralelo.
Bobina de Acople	Debe soportar los niveles de corriente impuestos por la carga (200 A), su valor será determinado por la relación entre rata de cambio de corriente y la tensión de salida del puente H. Para este caso se debe trabajar con una bobina de 25 mH.
Transformador de aislamiento	Potencia Nominal 120 KVA, relación de transformación 100:1. Con Taps intermedios con los cuales se pueda cambiar la relación de conversión.

### C. MÓDULO DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS

El módulo de Control, es el elemento más importante del sistema, encargado de la generación de corriente controlada en la tubería de producción. Por consiguiente, la selección de este módulo debe hacerse teniendo en cuenta dos factores: un factor software, en el cual esta desarrollada la ley de control y la interfaz de usuario. El segundo factor es el hardware, elemento que soporta el software, para lo cual se requiere de un equipo de gran capacidad de cómputo, para procesar algoritmos robustos y adaptativos de control. También, es deseable que sea fácil programación y robustez estructural para soportar las condiciones de campo, como los computadores de campo o Field-point.

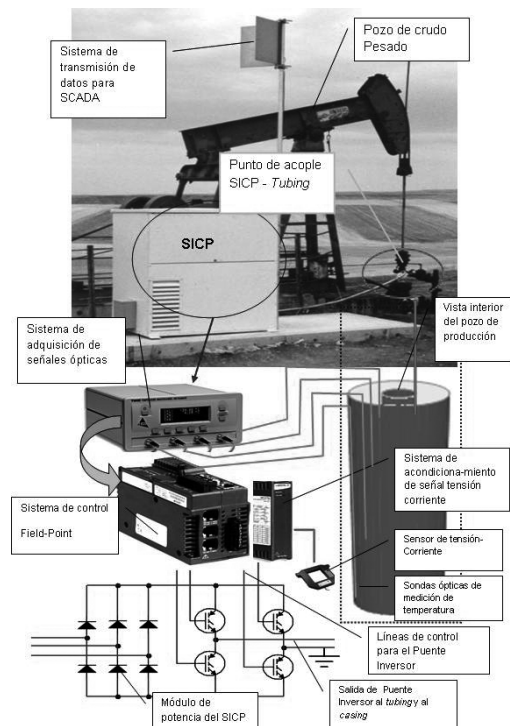
Otro factor importante a considerar dentro del sistema de control es la adquisición de señales de retroalimentación, indispensables para contrastar las acciones de control en el sistema. Por consiguiente, de la precisión y exactitud de las señales adquiridas, depende el desempeño de la

ley de control. Por tal motivo, se requiere un sistema auxiliar de equipos que permita sensar las variables de control definidas para el SICP: temperatura en puntos estratégicos a lo largo del pozo, señales de corriente y tensión en la carga; señales que deben ser adquiridas con un alto grado de confiabilidad bajo las condiciones de presión, temperatura, interferencia electromagnética y factores corrosivos.

Por lo tanto, para el sistema de adquisición de señales de temperatura se opto por utilizar sensores ópticos, que son inmunes a la interferencia electromagnética generada en el interior de la tubería, además, son livianos e inmunes a agentes corrosivos. Asimismo, la fibra óptica, es un medio ideal de transmisión de señales a largas distancias sin necesidad de equipos repetidores, lo que simplifica el diseño y la instalación. Por último, para la adquisición de las señales de corriente y de tensión de salida del SICP se recomienda utilizar sondas de efecto Hall, dimensionadas para adquirir correctamente los niveles de tensión y corriente en la carga (tubería de producción).

En la **Figura 7**, se aprecia una vista general de sistema de control, en la cual se puede distinguir claramente los elementos funcionales que lo constituyen: El dispositivo de control y los equipos auxiliares de instrumentación electrónica.

## 4. RESULTADOS



**Figura 7.** Esquema general de conexión del SICP

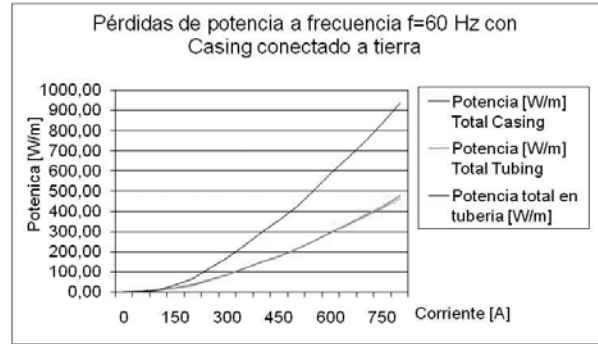
A partir del modelo planteado en la sección II se realizaron múltiples simulaciones para un pozo cuyas características están definidas en la **Tabla 2**, en donde se fijan los parámetros geométricos y eléctricos de la tubería de un pozo de estudio, además, se definen los valores con los cuales fue elaborada la discretización de la solución de la ecuación del campo magnético  $H_\varphi$  planteada en la ecuación recursiva (4).

**Tabla 2.** *Parámetros de entrada para el modelo electromagnético de la tubería*

DATOS DE ENTRADA PARA EL PROGRAMA:	
Radio interno del casing: $r_i$	83,2 mm
Radio externo del casing: $r_w$	89,3 mm
Radio interno del tubing: $r_i$	38,1 mm
Radio externo del tubing: $r_w$	44,3 mm
Permeabilidad relativa: $\mu_r$	269,0
Conductividad Eléctrica: $\sigma_s$	$7,3 \times 10^6$ S/m
DATOS PARA EL CÁLCULO DEL ALGORITMO SOLUCIÓN	
Frecuencia: $f$	0,1-100 Hz
Tamaño del paso de tiempo: $\Delta t$	34,7 $\mu$ sec
Tamaño de la celda: $\Delta r$	0,2 mm
Número de cuadrículas: N nodos	31 - 61
Número de pasos por ciclo de tiempo:	480

Como resultado de la simulaciones, se presenta dos gráficas, **Figuras 8 y 9**, en las cuales se muestran las curvas características de las pérdidas eléctricas en la tubería en función de la amplitud y la frecuencia de la corriente inyectada a una tubería de un metro de longitud. Con estas curvas se puede calcular la cantidad de potencia consumida para pozos que tengan las mismas dimensiones geométricas y el mismo tipo de tubería (J, K o L) [22]. En efecto, los valores de potencia están normalizados por unidad de longitud. Por lo tanto, para calcular el valor total de potencia requerida, solo basta con multiplicar el valor de potencia seleccionado por la longitud en metros que tenga el pozo.

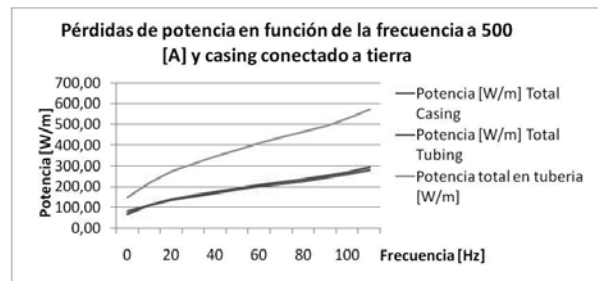
En la **Figura 8** se puede evaluar el comportamiento del tubing y el casing sometidos a un barrido de corriente, con una frecuencia fija de 60 Hz. En la cual se puede apreciar el efecto de la amplitud de corriente, a mayor cantidad de corriente las pérdidas por unidad de longitud aumentan de forma cuadrática, se cumple que  $P=I^2R$ .



**Figura 8.** *Curvas de pérdidas eléctricas en tubería versus corriente @ frecuencia de 60 Hz*

Aparte, en la **Figura 9**, se visualizan las curvas de las pérdidas en función de la frecuencia para una corriente fija de 500 A, donde se aprecia un comportamiento no constante, como se podría esperar de un conductor ideal (resistencia constante, potencia efectiva constante). Sin embargo, debido a que el acero es un material ferromagnético los efectos de la histéresis del material aumentan la potencia pérdida de modo casi proporcional con la frecuencia de operación.

Este comportamiento es deseable teniendo en cuenta que se busca generar la mayor cantidad de calor en la tubería. Sin embargo, en este artículo solo se tratara el principio de calentamiento resistivo (bajas frecuencias) y no se hará un estudio de las frecuencias medias (calentamiento inductivo), en las cuales se puede presentar un punto de resonancia.



**Figura 9.** *Curvas de pérdidas eléctricas en un metro de tubería de producción versus Frecuencia @ corriente de 500 A*

Como prueba final, se presenta en la **Figura 10**, los resultados obtenidos utilizando el prototipo para realizar control de temperatura en un circuito equivalente del pozo C-70, modelo al cual se le modifico la componente resistiva, debido a que no se encontraba en el mercado una referencia con un valor tan bajo. No obstante, la respuesta del sistema es aceptable e igualmente valida. En la grafica se puede apreciar que la fuente tiene una frecuencia de 100Hz, la temperatura de referencia esta fijada en 40° C y el sistema parte de una temperatura de 30°C, la referencia es alcanzada en 3 segundos.



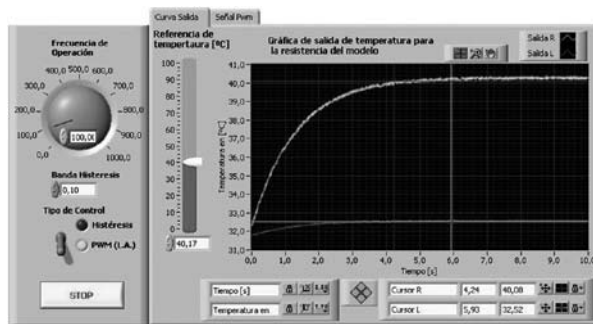


Figura 10. Prueba de prototipo en control de temperatura

## 5. CONCLUSIONES

Por medio del SICP se alcanza a mejorar la producción de un pozo petrolero ya que puede llegar a reducir considerablemente la viscosidad o los tapones de parafinas del crudo en ascenso por la tubería, por medio del calentamiento controlado. Permitiendo de este modo facilitar el transporte de crudo hacia la superficie. Reflejándose en una disminución considerable en costos de limpieza y mantenimiento de la tubería.

Es importante conocer de antemano cuanta potencia es requerida para realizar un efecto significativo en la viscosidad del crudo, a fin de obtener el valor ponderado de potencia por metro de tubería. En efecto, se necesitaría un estudio reológico de viscosidad versus temperatura para cada pozo candidato, a fin de ubicar el valor diferencial de temperatura ideal y traducirlo en potencia, para contrastar si esta dentro de los rangos permitidos por el SICP.

La potencia de 100kVA como potencia nominal del SICP, además de ser una potencia frecuentemente utilizada en el estado del arte [9 - 12], puede funcionar para un buen número de configuraciones de pozos que no requieran más potencia en sus procesos de calentamiento. Pero en el caso de que se requiera manejar mayor potencia, no haría falta realizar cambios sustanciales en el diseño y selección de componentes, gracias a que el sistema es modular. Solo sería necesario cambiar los elementos del modulo de potencia a las nuevas necesidades. Por tanto, el sistema de control y de adquisición de datos es el mismo para todos los sistemas.

La selección de la frecuencia de la señal de corriente, es tarea del algoritmo de control. Para lo cual, se necesita realizar un procedimiento de encuesta con señales de prueba a diferentes frecuencias con amplitud constante. En efecto, el punto de operación que mejor resultado obtenga en la relación “potencia de salida – calor generado – factor de potencia” será fijado por el sistema para aumentar la magnitud de la corriente hasta alcanzar

la temperatura deseada o hasta alcanzar el nivel de potencia máximo que pueda entregar el SICP.

Es de esperarse entonces que el sistema de control se sintonice a la mayor frecuencia posible de salida, según lo expuesto en las graficas de simulación. Sin embargo, para nuestro caso esa frecuencia esta en el orden de los 250 Hz, ya que el sistema de control del prototipo realiza muestreo a 2500Hz (utilizando el criterio de trabajar con una frecuencia 10 veces mayor a la del sistema). Sin embargo, en un equipo como el Field-Point, se pueden alcanzar frecuencias de muestreo del orden de los 100KHz, lo que significa que se puede llegar a trabajar hasta una frecuencia de 10KHz de señal de corriente.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Caruso G.** Coloquio “Centro para Estudios Estratégicos e Internacionales (CSIS) de Washington”, Agencia para la Administración Energética EIA, EE.UU.
- [2] **Agencia Nacional de Hidrocarburos**, Perspectivas de nuevas reservas, Julio 2005.
- [3] **ECOPETROL**, Estadísticas Volumétricas de la Industria Petrolera, Colombia 2006.
- [4] **SAHNI, A., KUMAR, M. y K.NAPP, R. B.**, Electromagnetic Heating for Heavy Oil Reservoirs. Society Engineer of Petroleum. SPE 62550.
- [5] **Bruce C. W. McGee**, Fred E. Vermeulen, Power Losses in Steel Pipe Delivering Very Large Currents, IEEE transactions on power delivery. Canada 1990.
- [6] **Burden Richar, Douglas J**, Análisis Numérico, International Thomson Editores, 1998.
- [7] **Hayt William**, Teoría electromagnética, quinta edición Mac Graw Hill. 1995.
- [8] **Carozzi A, Erikson A, Lundborg B y Thidé B.** Electromagnetic Field Theory. Swedish Institute of Space Physics, 2003.
- [9] **Bridges, J. Dubiel, G.** Power sources for downhole electrical heating. Patente N° 509918. Oficina de Patentes de Canadá.1992.
- [10] **Bridges, J.**Electrical Heating Systems for low cost retrofitting of oil wells. Patent N° 2090629. Oficina de Patentes de Canadá.

- [11] **Killoughand, J.E. And Gonzalez.** A Fully-Implicit Model for Electrically Enhanced Oil Recovery., J.A. SPE 15605. 1986.
- [12] **McPherson R., Chute F. y Vermeulen F.** Recovery of Athabasca bitumen with the Electromagnetic Flood (EMF) process, 1985 The Journal Petroleum Canadian.
- [13] **Castelblanco Nelfor,** Filtros Activos: Control por DSP de un Filtro Activo para la Compensación de Corrientes Armónicas, Tesis de maestría, Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [14] **RASHID Muhammad,** Electrónica de Potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones. Pearson 1995.
- [15] **Chapman Stephen,** Máquinas Eléctricas, tercera edición, Mc Graw Hill, 2000.
- [16] **Dorf Richar, Bishop Rober,** Sistemas de Control Moderno, 10ª edición, Pertince Hall, España 2005.
- [17] **Aström Karl, Wittenmark Björn,** Computer-Controlled Systems Theory and Desing, Prentice Hall, 1997.
- [18] **PDVSA,** Fundamentos de ingeniería de petróleos, Venezuela, 2005.
- [19] **Beal C.** The viscosity of air, Natural Gas, Crude Oil and its Associated Gases at Oilfield Temperatures and Pressures, Transactions of American Institute of Mining and Metallurgical Engineers.
- [20] **Kreith, Frank.** Principios De Transferencia De Calor. Mexico Thomson Learning, 2001.
- [21] **Moody L.** Friction Factors for Pipe Flow, Transactions of American Society of Mechanical Engineers Vol 66 USA 1964.
- [22] **Norma API 5CT ISO 11960,** Norma estandar para la construcción y pruebas mecanicas y quimicas de la tuberia de producción.